中国生态农业学报 2016 年 11 月 第 24 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2016, 24(11): 1482−1490

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160522

单粒精播对夏直播花生生育生理特性和产量的影响*

张佳蕾[1] 郭 峰[1] 孟静静[1] 杨 莎[1] 耿 耘[1] 王丽丽[2]
张 楠[3] 李新国[1] 万书波[1]**

(1. 山东省农业科学院生物技术研究中心/山东省作物遗传改良与生态生理重点实验室 济南 250100; 2. 文登区农业技术推广站 威海 264400; 3. 文登区大水泊镇农业技术服务中心 威海 264400)

摘 要 为探明单粒精播对夏直播花生的个体发育和群体结构以及产量的影响，以'花育 22 号'花生为试验材料，研究了麦茬夏直播花生单粒精播(SS)和双粒穴播(DS)在相同密度条件下的植株发育动态、叶片生理特性和产量及其构成因素的差异。结果表明：夏直播花生单粒精播在生育前期的主茎高和侧枝长均高于双粒穴播，而在生育后期则低于双粒穴播，但差异不显著。单粒精播在各个生育期的主茎节数、主茎绿叶数、分枝数和叶面积指数均高于双粒穴播，尤其是分枝数差异显著。夏直播花生单粒精播在饱果期和成熟期的叶片 SOD、POD、CAT 活性和叶绿素含量以及净光合速率均高于双粒穴播，而其 MDA 含量低于双粒穴播，其中在成熟期除了 CAT 活性差异不显著外，其余指标均显著差异。夏直播花生单粒精播的单株饱果数增多，单株果重增加，荚果产量显著高于双粒穴播。夏直播花生荚果产量与单株果重和叶片净光合速率极显著正相关，与经济系数、主茎绿叶数、叶面积指数和叶绿素含量呈显著正相关。

关键词 花生 夏直播 单粒精播 植株性状 生理特性 产量
中图分类号: S565.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)11-1482-09

Effect of single-seed sowing on growth, physiology and yield of summer peanut*

ZHANG Jialei[1], GUO Feng[1], MENG Jingjing[1], YANG Sha[1], GENG Yun[1], WANG Lili[2],
ZHANG Nan[3], LI Xinguo[1], WAN Shubo[1]**

(1. Biotechnology Research Center, Shandong Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Genetic Improvement and Ecological Physiology of Shandong Province, Jinan 250100, China; 2. Agricultural Technology Promotion Station of Wendeng District, Weihai 264400, China; 3. Agrotechnical Service Center of Dashuipo Township, Weihai 264400, China)

Abstract Summer-sowing peanut has developed rapidly with a planting model of peanut-wheat relay cropping. However, studies on individual development and population structure of summer-sowed peanut were inadequate. To supplement this deficiency, a field experiment was conducted in 2014 and 2015, to study the differences in plant development, leaf physiological characteristics and yield components between single-seed (SS) and double-seed (DS) sowed summer peanut. The previous crop was wheat, which was harvested on June 15. The peanut cultivar 'HY22' was sowed on ridges and mulched with plastic film on June 20. The ridge was 50 cm with a furrow spacing of 30 cm. Plant spacing was 10 cm for SS, 20 cm for DS, and the plant density was same for both treatments, 2.5×10^5 plant·hm^{-2}. The results showed that main stem height and lateral branch length of SS treatment were higher than those of DS treatment at the early growth stage, however they became lower

* 国家自然科学基金项目(31571581, 31571605)、国家科技支撑计划项目(2014BAD11B04)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-14)、山东省农业重大应用技术创新课题和山东省农业科学院青年科研基金项目(2015YQN12)资助
** 通讯作者: 万书波，主要从事花生高产优质栽培研究。E-mail: wansb@saas.ac.cn
张佳蕾，主要从事花生高产优质栽培生理生态研究。E-mail: zhangjialei19@163.com
收稿日期: 2016−06−06 接受日期: 2016−07−28

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31571581, 31571605), the National Key Technologies R&D Program of China (2014BAD11B04), the Special Fund for Modern Agro-industry Technology Research System (CARS-14), the Project of Significant Agricultural Technology Innovation in Shandong Province, and the Youth Scientific Research Foundation of Shandong Academy of Agricultural Sciences (2015YQN12).
** Corresponding author, E-mail: wansb@saas.ac.cn
Received Jun. 6, 2016; accepted Jul. 28, 2016

than those of DS at the late growth stage. The numbers of both node and leaf in main stem, leaf area index and especially branch numbers of SS were all higher than those of DS during the whole growth period. The activities of SOD, POD and CAT, chlorophyll content and photosynthetic rate increased, while MDA content reduced at pod-filling stage and maturation stage in SS treatment. Although no significant differences was observed on above leaf physiological indexes between SS and DS treatments at pod-filling stage, but the differences was remarkable at maturity stage. Pod yield of SS increased significantly compared with DS treatment due to a significant increase in full pod number per plant. And it positively related to both pod weight per plant and photosynthetic rate. This implied that it was positively correlated with economic coefficients, leaf number per main stem, leaf area index and chlorophyll content.

Keywords　Peanut; Summer sowing; Single-seed sowing; Plant character; Physiological characteristics; Yield

夏直播花生(*Arachis hypogaea*)主要是与小麦(*Tricum aestivum*)接茬轮作，实现了小麦、花生一年 2 熟[1]。夏直播花生因其操作较麦套花生简单，更适合大规模机械化生产的要求，且不与粮食(主要是小麦)争地，生产规模发展迅速，已超过麦套花生的播种面积。据统计在河南、江苏、山东等花生主产区，夏播花生种植面积已占花生总种植面积的 50%以上[2]。前人对夏直播花生的研究多集中在前茬处理、播种方式、播期、水分胁迫以及不同肥料对其生长发育和产量影响方面[3–6]，而对夏直播花生的个体发育和群体结构方面研究较少。研究表明合理的种植方式及种植密度能够有效改善群体结构，减少群体与个体间的矛盾[7–9]，采取合理的种植方式及种植密度，对延缓花生衰老、提高夏直播花生产量具有重要意义。

从对小麦、玉米和水稻三大作物的研究来看，理想株型和群体的构建对于高产的实现至关重要。赵明等[10–11]提出在夏玉米超高产中，以“群体结构性获得”为主要突破途径，而在高密度群体中进一步挖掘“个体功能性获得”将是玉米超高产栽培的主要目标。慕美财等[12]研究表明，“稳叶控株增穗”途径下的高产麦田群体在增源、扩库、畅流方面都具有明显优势。较高的生物学产量是水稻(*Oryza sativa*)高产的重要特征之一，而在各生育期干物质积累、经济系数及其与产量的关系等方面，则因栽培生态区域、所用品种类型以及栽培技术体系等方面的差异而有所不同[13–15]。花生产量构成因素、个体发育与群体结构表现消长规律，三者结构合理与否是权衡群体高产的重要标志[16]。传统双粒穴播花生在高产条件下，群体与个体矛盾突出，容易出现大小株现象，群体质量下降，产量降低。以单粒精播代替双粒穴播，可以缓解花生群体与个体的矛盾，实现花生高产高效[17–20]。而目前关于麦茬夏直播花生单粒精播与双粒穴播的产量差异研究较少。因此，研究夏直播花生在单粒精播和双粒穴播下的植株发育动态差异，明确单粒精播对夏直播花生的个体发育和群体结构以及产量影响，可为夏直播花生单产水平的进一步提高提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料与试验设计

供试花生品种为‘花育 22 号’(HY22)，于 2014—2015 年在山东省冠县梁堂乡的高产田中进行。2014 年试验田 0~20 cm 土层有机质含量为 11.85 g·kg^{-1}，碱解氮为 49.3 mg·kg^{-1}，速效磷为 62.6 mg·kg^{-1}，速效钾为 92.8 mg·kg^{-1}; 2015 年 0~20 cm 土层有机质含量为 16.45 g·kg^{-1}，碱解氮为 68.5 mg·kg^{-1}，速效磷为 92.1 mg·kg^{-1}，速效钾为 110.7 mg·kg^{-1}。

前茬作物为小麦，于 6 月 15 日收获，秸秆全部粉碎还田，施复合肥(15-15-15)1 125 kg·hm^{-2}，造墒之后旋耕。于 6 月 20 日播种，10 月 5 日收获，全生育期 110 d 左右。起垄覆膜栽培，垄距 80 cm，垄面宽 50 cm，垄上播种两行，行距 30 cm。

试验设单粒精播和双粒穴播两个处理。单粒精播(SS)株距 10 cm，每穴 1 粒，种植密度是 25 万株·hm^{-2}; 双粒穴播(DS)穴距 20 cm，每穴两粒，种植密度 12.5 万穴·hm^{-2}。两种种植方式各 3 次重复，共 6 个小区，每个小区面积 100 m^2，随机区组排列。其他田间管理措施同普通高产田。

1.2　测定项目与方法

1.2.1　植株性状调查

分别于开花期(7 月 15 日左右)、结荚期(7 月 30 日左右)、饱果期(8 月 25 日左右)和成熟期(9 月 30 日左右)在各小区选有代表性地段连续取样 10 株，考察主茎高、侧枝长、分枝数、主茎节数、主茎绿叶数等。同时每株取 10 片叶(下部 2 片，中部 5 片，上部 3 片)，叠成一摞，使叶脉对齐，以叶片中脉为中心，用打孔器打取小片，计算孔面积，烘干至恒重，并计算叶面积指数。单株叶面积(cm^2)=单株叶片重(g)×圆片总面积(cm^2)/小圆片叶总重(g)。

1.2.2　叶片净光合速率、叶绿素含量及保护酶活性的测定

于饱果期和成熟期在各小区选取受光方向一致

的主茎倒 3 叶，用便携式光合分析系统 LI-6400(美国 LICOR 公司生产)在晴天上午 9:00—11:00 点测定净光合速率。同时取主茎倒 3 叶，置于冰盒带回室内用于叶绿素含量和保护酶活性测定。将叶片鲜样去主脉，剪碎，用 95%乙醇提取 48 h，用 UV-2450 紫外分光光度计测定，计算叶绿素含量[21]；另称取 0.5 g 剪碎的鲜叶用 pH 7.8 的磷酸缓冲液冰浴研磨，匀浆于 4 000 $r\cdot min^{-1}$ 4 ℃冷冻离心 20 min，上清液用于叶片超氧化物歧化酶(SOD)[22]、过氧化物酶(POD)[23]、过氧化氢酶(CAT)[24]活性测定和丙二醛(MDA)[25]含量测定。SOD 以抑制 NBT 光化还原 50%作为 1 个酶活单位, POD 以每分钟 A470 变化量为单位, CAT 以每分钟 H_2O_2 变化量为单位。

1.2.3　产量构成因素考察

收获时每个小区连续取样 20 株，考察单株结果数、饱果数和秕果数，荚果自然风干测定单株果重。各小区去掉边行和两头后量取 8 m^2，刨收、摘果、去杂，自然风干，计算荚果产量。取地上部植株(包括落叶)自然风干后称重，计算经济系数。经济系数=荚果重/(荚果重+地上部植株重)。

1.3　数据处理

采用 DPS 7.05 软件最小显著极差法(LSD)进行平均数显著性检验；用 SPSS 16.0 软件进行数据相关性分析；采用 Origin Pro8.0 软件作图。

2　结果与分析

2.1　夏直播花生单粒精播与双粒穴播各生育期植株性状差异

2.1.1　主茎高和侧枝长

图 1 表明，夏直播花生的主茎高和侧枝长前期生长较快，饱果期之后增长速度减慢。单粒精播(SS)与双粒穴播(DS)相比，前者的主茎高和侧枝长在生育前期要高于后者，但差异不显著，在结荚期 SS 的主茎高比 DS 大 1.44 cm(两年平均)，侧枝长比 DS 大 1.30 cm。说明单粒精播花生能早发快长，有利于提早封垄。而双粒穴播的主茎高和侧枝长在生育后期增长速度要明显快于单粒精播, SS 在 2014 年成熟期的主茎高以及饱果期和成熟期的侧枝长均显著低于 DS，在 2015 年差异较小，成熟期 DS 的主茎高两年平均比 SS 的大 2.22 cm，侧枝长比 SS 大 2.94 cm。

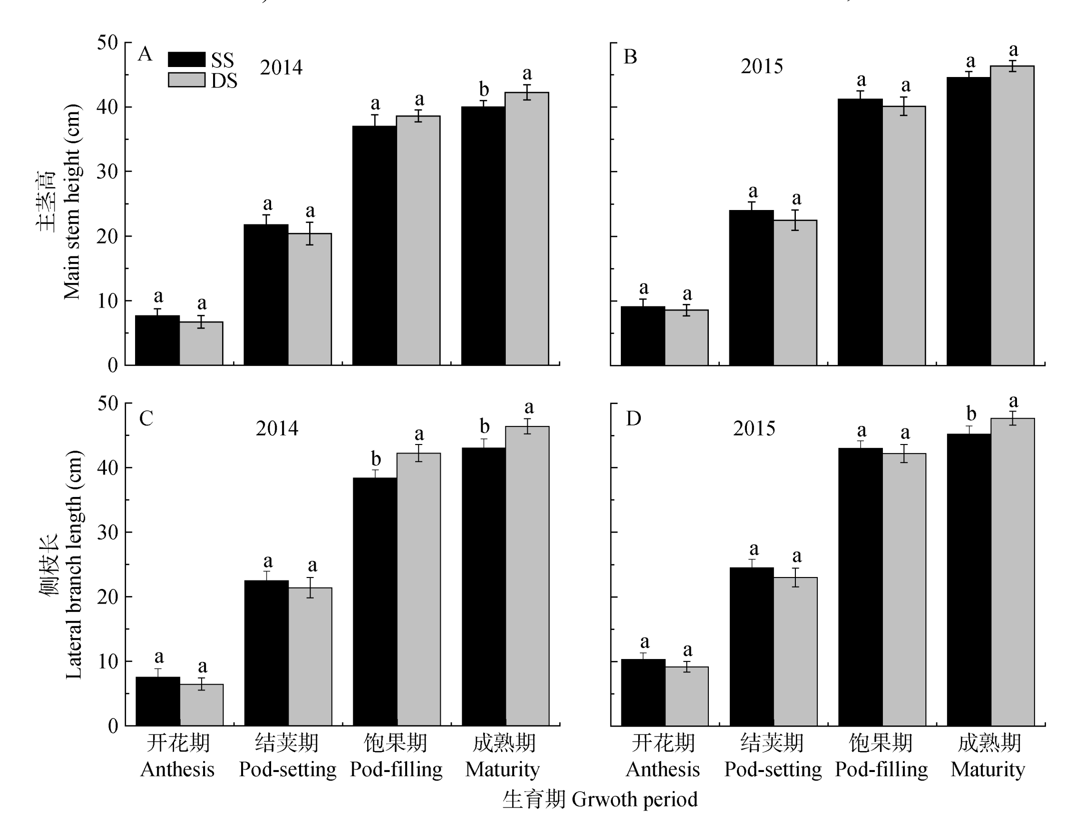


图 1　2014 年和 2015 年夏花生单粒精播(SS)与双粒穴播(DS)各生育期主茎高和侧枝长

Fig. 1　The main stem height and lateral branch length of peanuts in different growth periods under single-seed (SS) and double-seed (DS) of summer sowing conditions in 2014 and 2015

2.1.2　主茎节数和主茎绿叶数

夏直播花生单粒精播(SS)和双粒穴播(DS)的主茎节数动态变化与其主茎高和侧枝长发育动态基本一致，前期增长较快，后期增长较慢(图 2A，B)。SS

在整个生育期的主茎节数均大于 DS，在 2014 年差异较小，在 2015 年差异显著。结合主茎高的变化动态，可以表明 DS 在生育后期的主茎增长是通过增加节间长度而不是增加节间数。两种种植方式的主茎绿叶数呈单峰曲线，前期增长较快，到饱果期达到最大值，之后由于植株下部叶片衰老掉落而使主茎绿叶数减少(图 2C, D)。SS 在各个生育期的主茎绿叶数均大于 DS，2014 年 SS 在饱果期的主茎绿叶数比 DS 多 1.01 个，2015 年 SS 在饱果期的主茎绿叶数比 DS 多 1.33 个，在成熟期比 DS 多 1.58 个。

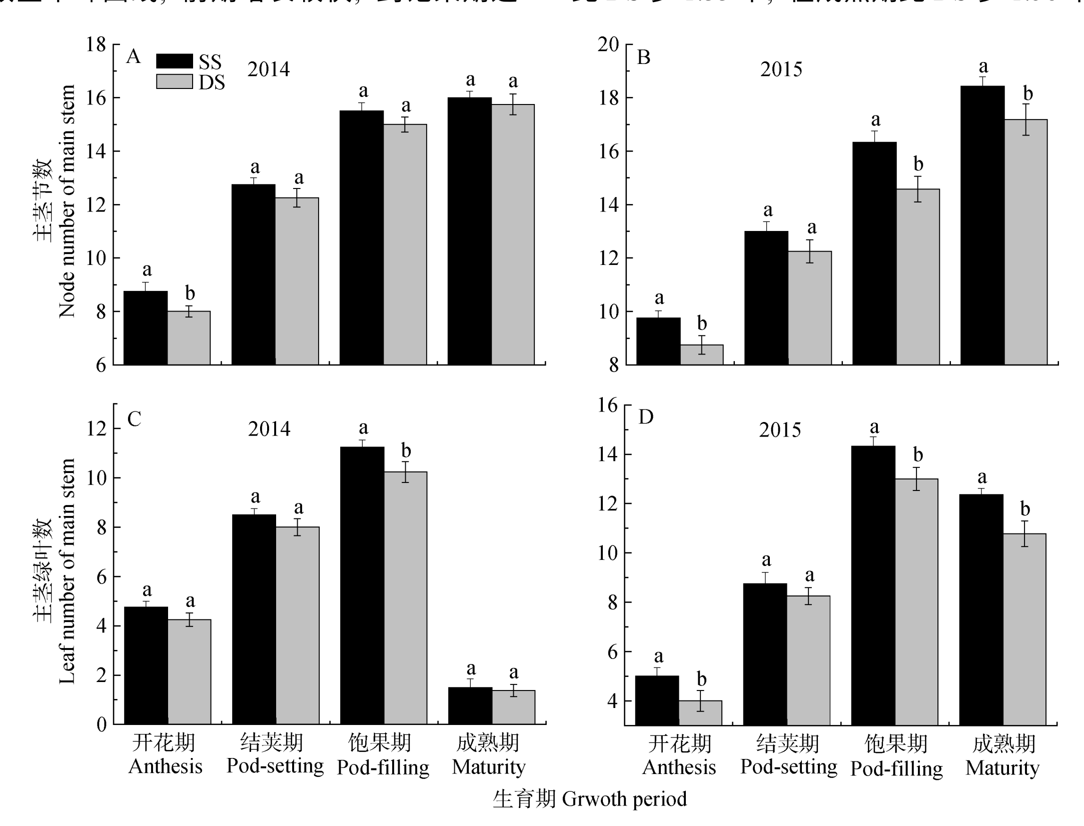


图 2　2014 年和 2015 年夏花生单粒精播(SS)与双粒穴播(DS)各生育期主茎节数(A, B)和主茎绿叶数(C, D)

Fig. 2　The number of main stem nodes (A, B) and number of leaf of main stem (C, D) of peanuts in different growth periods under single-seed (SS) and double-seed (DS) of summer sowing conditions in 2014 and 2015

2.1.3　分枝数和叶面积指数

单粒精播(SS)和双粒穴播(DS)在各生育期的分枝数差异显著，SS 的分枝数要显著高于 DS(图 3A, B)。两种种植方式的分枝数在开花期之前差异较小，结荚期之后差异变大。2014 年 SS 在成熟期的分枝数为 11.25，比 DS 的分枝数多 2 条。2015 年 SS 在成熟期的分枝数也为 11.25，比 DS 的多 1.5 条。SS 较多的分枝数可以着生较多的下位果针，有利于果针提早下扎增加饱果的数量。SS 和 DS 的叶面积指数变化动态与其主茎绿叶数变化趋势基本一致，前期增长较快，饱果期达到最大值后随着落叶而降低(图 3C, D)。2014 年 SS 在饱果期的叶面积指数显著高于 DS(SS 为 4.57，DS 为 4.15)。2015 年 SS 在饱果期和成熟期的叶面积指数均显著高于 DS(SS 分别为 4.81 和 3.27，DS 分别为 4.38 和 2.85)，说明 SS 生育后期的植株保绿性较好，能较长时间保持较大的叶面积，有利于光合产物的积累。

2.2　夏直播花生单粒精播与双粒穴播叶片生理特性差异

由表 1 可知，两种种植方式在饱果期的叶片 SOD、POD 和 CAT 活性、MDA 含量、叶绿素含量以及净光合速率差异较小，而在成熟期的差异显著。2014 年 SS 在饱果期和成熟期的叶片 SOD 活性和净光合速率均显著高于同期 DS 的，而 SS 在两个生育期 MDA 含量要显著低于 DS，SS 在成熟期的 POD 活性和叶绿素含量显著高于 DS。2015 年 SS 在饱果期和成熟期的叶片 POD 活性显著高于 DS，而两个生育期的 MDA 含量显著低于后者。SS 在成熟期的 SOD 活性、叶绿素含量和净光合速率均显著高于 DS。SS 和 DS 在成熟期的保护酶活性、叶绿素含量以及净光合速率差异要大于在饱果期的差异，说明两种种植方式的叶片生理特性在成熟期的差异较大，单粒精播能延缓植株衰老，从而保持较高的光合能力。

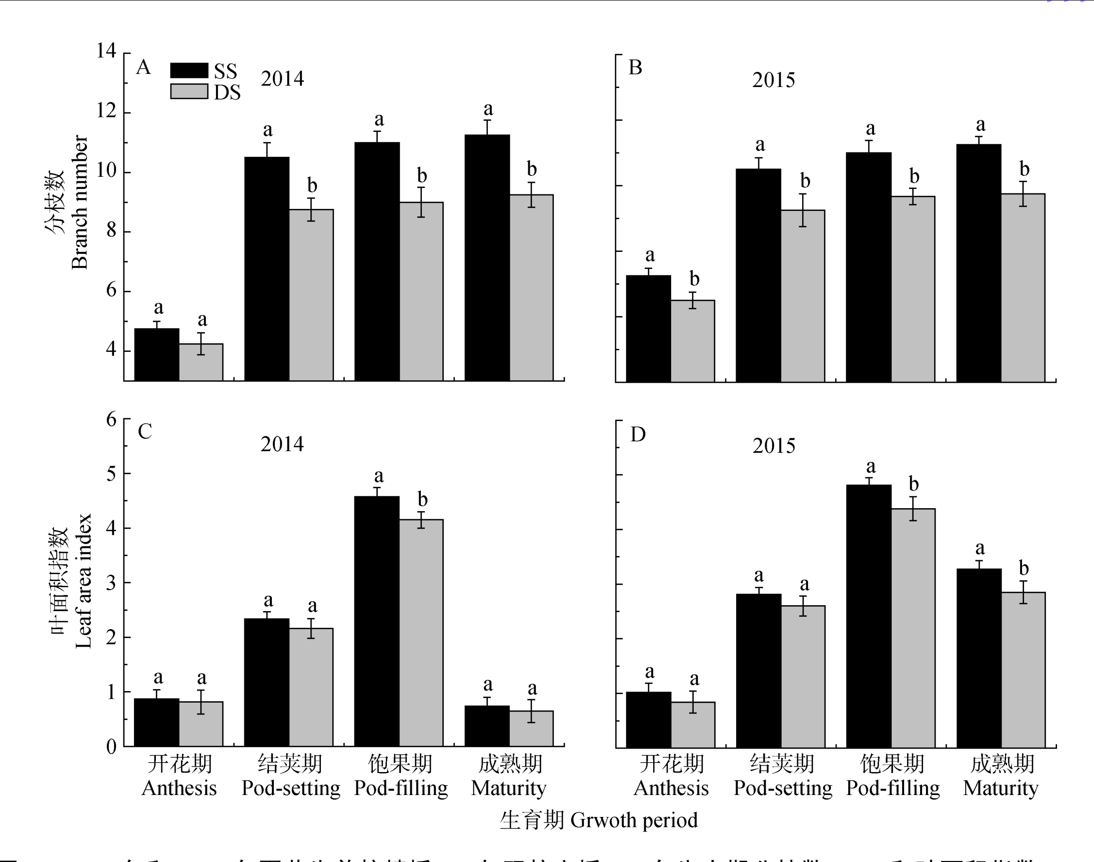


图 3　2014 年和 2015 年夏花生单粒精播(SS)与双粒穴播(DS)各生育期分枝数(A, B)和叶面积指数(C, D)

Fig. 3　The branch number (A, B) and leaf area index (C, D) of peanuts in different growth periods under single-seed (SS) and double-seed (DS) of summer sowing conditions in 2014 and 2015

表 1　2014 年和 2015 年夏花生单粒精播(SS)与双粒穴播(DS)的叶片抗氧化性能、叶绿素含量和净光合速率

Table 1　The oxidation resistance, chlorophyll content and net photosynthetic rate of leaves under single-seed (SS) and double-seed (DS) of summer sowing conditions in 2014 and 2015

年份 Year	生育期 Growth period	处理 Treatment	SOD ($U \cdot g^{-1}$)	POD ($\Delta 470 \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)	CAT (H_2O_2 $mg \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)	丙二醛含量 MDA content ($\mu mol \cdot g^{-1}$)	叶绿素含量 Chlorophyll content ($mg \cdot g^{-1}$)	净光合速率 Net photosynthetic rate ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
2014	饱果期 Pod-filling	SS	94.58±3.27a	48.55±2.13a	7.83±0.57a	7.82±0.37b	1.67±0.06a	26.56±0.67a
		DS	86.25±3.65b	47.28±2.76a	7.28±0.48a	8.76±0.41a	1.61±0.04a	24.31±0.52b
	成熟期 Maturity	SS	58.32±2.89a	35.29±1.68a	5.13±0.43a	11.87±0.68b	1.25±0.03a	14.56±0.62a
		DS	52.78±3.17b	31.45±2.36b	4.87±0.47a	13.65±0.54a	1.15±0.02b	12.72±0.48b
2015	饱果期 Pod-filling	SS	104.78±4.65a	57.21±2.51a	8.48±0.52a	6.42±0.39b	1.71±0.04a	28.17±0.44a
		DS	98.35±3.98a	52.87±1.67b	7.96±0.38a	7.57±0.53a	1.65±0.05a	26.84±0.58a
	成熟期 Maturity	SS	84.23±5.27a	47.78±2.22a	6.15±0.34a	8.79±0.67b	1.48±0.06a	20.82±0.67a
		DS	69.65±3.54b	42.87±2.05b	5.77±0.42a	11.62±0.55a	1.33±0.03b	17.15±0.75b

同列同年同生育期不同小写字母表示差异达 5%显著水平，下同。Different lowercase letters in the same column for the same growth period in the same year indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.3　夏直播花生单粒精播与双粒穴播产量和产量构成因素差异

由表 2 说明，夏花生单粒精播的单位面积荚果产量、单位面积株数、单株果重、单株饱果数和经济系数均高于双粒穴播。SS 在 2014 年的荚果产量比 DS 高 6.89%，单株果重比 DS 高 6.06%。SS 在 2015 年的荚果产量比 DS 高 8.74%，单株果重比 DS 高 5.86%，差异均达显著水平。SS 在两年中的单位面积株数均要高于 DS，也说明单粒精播花生的成株率要高于双粒穴播。两种种植方式的单株结果数差异不显著，但 SS 的单株饱果数要显著高于 DS(2014 年和 2015 年 SS 比 DS 分别高 17.71%和 45.16)，而 DS 的秕果和幼果数较多，说明影响夏花生荚果产量的关键因素是饱果数而不是单株结果数。SS 在 2014 年的经济系数比 DS 高 4.55%，在 2015 年的经济系数比 DS 高 8.51%。

表 2　2014 年和 2015 年夏花生单粒精播(SS)与双粒穴播(DS)产量和产量构成因素

Table 2　The pod yields and components under single-seed (SS) and double-seed (DS) of summer sowing conditions in 2014 and 2015

年份 Year	处理 Treatment	荚果产量 Pod yield ($kg\cdot hm^{-2}$)	单位面积株数 Plants per 6.67 m^2	单株果重 Pod weight per plant (g)	单株结果数 Pods per plant	饱果数 Full pods per plant	秕果数 Immature pods per plant	经济系数 Economic coefficient
2014	SS	6 328.4±136.2a	148±4.3a	30.26±0.78a	17.6±1.5a	11.3±0.6a	3.1±0.4a	0.46±0.02a
	DS	5 920.5±98.7b	142±3.7a	28.53±0.54b	16.5±1.3a	9.6±0.4b	2.3±0.5a	0.44±0.03a
2015	SS	7 585.3±165.2a	150±4.5a	34.67±0.65a	21.7±1.6a	13.5±1.2a	4.3±1.3b	0.51±0.02a
	DS	6 975.6±143.9b	145±3.3a	32.75±0.72b	22.6±1.9a	9.3±1.5b	8.6±2.2a	0.47±0.01b

2.4　夏直播花生产量构成与植株性状及光合能力相关性分析

将两种种植方式收获时的荚果产量、单株果重、单株结果数、经济系数与成熟期的主茎高、分枝数以及与饱果期和成熟期的主茎绿叶数、叶面积指数、叶绿素含量、净光合速率进行相关性分析表明(表 3), 单位面积荚果产量与单株果重和叶片净光合速率呈极显著正相关, 与经济系数、主茎绿叶数、叶面积指数和叶绿素含量呈显著正相关, 而与单株结果数、主茎高和分枝数的正相关性不显著。单株果重与经济系数、主茎绿叶数、叶面积指数、叶绿素含量和净光合速率呈显著正相关。经济系数与净光合速率呈显著正相关, 与叶绿素含量呈极显著正相关。叶面积指数与主茎绿叶数呈极显著正相关。净光合速率与叶面积指数呈显著正相关, 与叶绿素含量呈极显著正相关。

表 3　夏直播花生产量与植株性状和光合能力相关性分析

Table 3　Correlation analysis between pod yield and plant characters, photosynthetic capacity of summer sowing peanut

	荚果产量 PY	单株果重 WP	单株结果数 PP	经济系数 EC	主茎高 MSH	分枝数 BN	主茎绿叶数 LMS	叶面积指数 LAI	叶绿素含量 Chl
单株果重 WP	0.998**								
单株结果数 PP	0.888	0.907							
经济系数 EC	0.968*	0.955*	0.743						
主茎高 MSH	0.659	0.669	0.871	0.469					
分枝数 BN	0.815	0.800	0.481	0.928	0.108				
主茎绿叶数 LMS	0.966*	0.969*	0.957*	0.877	0.830	0.641			
叶面积指数 LAI	0.987*	0.989*	0.941	0.918	0.769	0.713	0.995**		
叶绿素含量 CC	0. 973*	0.966*	0.771	0.995**	0.466	0.927	0.880	0.923	
净光合速率 Pn	0. 991**	0.988*	0.836	0.985*	0.552	0.881	0.923	0.957*	0.994**

*表示在 0.05 水平上显著相关; **表示在 0.01 水平上显著相关。PY: pod yield; WP: pod weight per plant; PP: pods per plant; EC: economic coefficient; MSH: main stem height; BN: branch number; LMS: leaf number of main stem; LAI: leaf area index; Chl: chlorophyll content; Pn: photosynthetic rate. *: significant at the 0.05 level; **: significant at the 0.01 level.

3　讨论与结论

夏直播花生由于生长期短, 单株生产力低, 为了创高产多采取增加密度的措施[3]。密植群体形成高产的关键在于构建合理的群体结构[26]。有研究表明, 随着花生密度的增加, 植株主茎高、侧枝长逐渐降低, 分枝数逐渐减少, 花生单株果数、百果重、双仁率和饱果率逐渐降低, 花生产量随密度的增加呈现抛物线趋势。单粒播种的个体在田间分布均匀, 减轻或消除了群体内部个体之间对光照、肥水等需求的矛盾, 有利于营养生长和干物质积累, 形成壮苗[27]。本研究结果表明, 夏花生单粒精播在生育前期的植株营养生长要快于双粒穴播, 其主茎高、侧枝长、分枝数、主茎节数、主茎绿叶数和叶面积指数等均高于后者。这也与我们之前对春花生单粒精播的研究结果一致[20]。这表明单粒精播有利于形成壮苗, 构建合理群体结构。本研究中单粒精播在成熟期的主茎高和侧枝长要低于双粒穴播, 主茎节数和分枝数均显著高于双粒穴播, 说明夏花生双粒穴播在生育后期节间伸长较快, 有徒长趋势。

前人研究表明, 合理群体结构的构建, 最重要的是叶面积的建成, 叶面积指数大小和叶面积指数峰值持续期, 直接影响干物质的生产能力[28]。花生高产的主要问题是如何提高光能利用率, 而提高光能利用率首先要增大有效叶面积[16]。叶面积指数峰值持续时间长是高产花生的一个显著特点[29]。郑亚萍等[30]对山东高产花生群体研究表明, 春花生 LAI

峰值出现在饱果期，峰值期 LAI 在 5 以上。本研究结果表明，夏直播花生 LAI 峰值也出现在饱果期，单粒精播的 LAI 最高为 4.81，显著高于双粒穴播的最高值 4.38。而双粒穴播由于生育后期落叶较重使叶面积指数低于单粒精播。冯烨等[31]研究指出，单粒精播可通过影响活性氧代谢水平延缓植株衰老进程，改善地上部群体和荚果的干物质积累动态，并且生育后期根系衰老死亡速率较慢，保证其地上部养分供给及物质的同化[19]。本研究结果与之一致，单粒精播在饱果期和成熟期的叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均高于双粒穴播，MDA 含量显著低于后者，说明夏花生单粒精播有利于改善植株衰老。单粒精播模式下花生叶片的光合色素含量、光合速率均高于传统双粒穴播[32]。本试验中单粒精播和双粒穴播在饱果期的叶绿素含量和净光合速率差异不大，但在成熟期由于单粒精播的植株保护酶活性较高，叶片衰老较慢，使生育后期的叶绿素含量和净光合速率均显著高于双粒穴播。

沈毓骏等[33]在花生控制下针(AnM)法基础上研究夏花生减粒增穴的种植方法，比现行密度常规种植每公顷播种粒数减少 23%，穴数则增加 54.1%，单株结实增多 52.8%，增产 18%左右。其原因是单粒播种易于形成壮苗，所以单株果数和单株产量都显著高于双粒播种。以上研究结果是基于单粒播的密度显著低于双粒播的密度条件下，而本研究是在相同密度条件下研究单粒精播与双粒穴播的产量构成差异，更利于控制试验条件，消除环境因子和水肥利用等的影响。结果表明双粒穴播的单株幼果数较多，单粒精播和双粒穴播的单株结果数差异不大，单株产量差异的关键因素在于单株饱果数的多少。夏花生单粒精播荚果产量高于双粒穴播的原因是单粒精播的单株饱果数增多，幼果数减少，从而增加了单株果重。前期对春花生单粒精播研究表明，单株果重与分枝数和叶面积指数显著正相关，与主茎高和侧枝长呈负相关[20]。而本试验条件下，夏花生单株果重与单株结果数、主茎高和分枝数呈正相关。对单株果重影响显著的因素是经济系数、叶面积指数、叶绿素含量和净光合速率。这表明较高的经济系数以及较高的光合能力是夏花生荚果产量提高的基础。

综上所述，夏直播花生单粒精播的植株个体发育和群体结构较优，其分枝数、主茎节数、叶面积系数要明显高于双粒穴播，有利于较早地构建营养体促进干物质较快积累。单粒精播生育后期的叶片保护酶活性、叶绿素含量和净光合速率要显著高于双粒穴播，植株衰老较慢，有利于保持较高的光合速率和延长光合时间。单粒精播的荚果产量要显著高于双粒穴播，原因是单粒精播的单株饱果数显著增加，从而提高了单株果重。单粒精播的成株率和经济系数要高于双粒穴播，也是单粒精播增产的原因之一。

参考文献 References

[1] Bandyopadhyay P K, Mallick S, Rana S K. Water balance and crop coefficients of summer-grown peanut (*Arachis hypogaea* L.) in a humid tropical region of India[J]. Irrigation Science, 2005, 23(4): 161–169

[2] 杨富军，赵长星，闫萌萌，等. 栽培方式对夏直播花生叶片光合特性及产量的影响[J]. 应用生态学报，2013，24(3): 747–752
Yang F J, Zhao C X, Yan M M, et al. Effects of different cultivation modes on the leaf photosynthetic characteristics and yield of summer-sowing peanut[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 747–752

[3] 孙彦浩，陶寿祥，陈殿绪，等. 夏花生矮化密植增产效果的研究[J]. 花生科技, 1999(2): 5–8
Sun Y H, Tao S X, Chen D X, et al. Study on increasing yield by dwarfing of summer peanut[J]. Peanut Science and Technology, 1999(2): 5–8

[4] 张翔，毛家伟，郭中义，等. 麦茬处理方式对夏花生播种质量与前期生长及产量的影响[J]. 花生学报，2013，42(4): 33–36
Zhang X, Mao J W, Guo Z Y, et al. Effects of wheat stubble treatments on sowing quality, early growth and yield of summer peanut[J]. Journal of Peanut Science, 2013, 42(4): 33–36

[5] 张俊，汤丰收，刘娟，等. 不同种植方式生育后期湿涝胁迫对花生生物量、根系形态及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 979–986
Zhang J, Tang F S, Liu J, et al. Effect of waterlogging stress on peanut biomass, root morphology and yield under different planting patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(8): 979–986

[6] 郑亚萍，初长江，王才斌，等. 有机无机肥配施对夏花生叶片衰老的影响[J]. 花生学报, 2009, 38(1): 22–26
Zheng Y P, Chu C J, Wang C B, et al. Effect of combining application of organic manure and chemical fertilizer on the senescence of leaf in summer-planting peanut[J]. Journal of Peanut Science, 2009, 38(1): 22–26

[7] 宋伟，赵长星，王月福，等. 不同种植方式对花生田间小气候效应和产量的影响[J]. 生态学报，2011，31(23): 7188–7195
Song W, Zhao C X, Wang Y F, et al. Influence of different planting patterns on field microclimate effect and yield of peanut (*Arachis hypogea* L.)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7188–7195

[8] 余利，刘正，王波，等. 行距和行向对不同密度玉米群体田

间小气候和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 938−942
Yu L, Liu Z, Wang B, et al. Effects of different combinations of planting density, row spacing and row direction on field microclimatic conditions and grain yield of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 938−942

[9] 吕丽华, 陶洪斌, 夏来坤, 等. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J]. 作物学报, 2008, 34(3): 447−455
Lü L H, Tao H B, Xia L K, et al. Canopy structure and photosynthesis traits of summer maize under different planting densities[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(3): 447−455

[10] 赵明, 李建国, 张宾, 等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1566–1573
Zhao M, Li J G, Zhang B, et al. The compensatory mechanism in exploring crop production potential[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(10): 1566–1573

[11] 陈传永, 侯玉虹, 孙锐, 等. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析[J]. 作物学报, 2010, 36(7): 1153−1160
Chen C Y, Hou Y H, Sun R, et al. Effects of planting density on yield performance and density-tolerance analysis for maize hybrids[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(7): 1153−1160

[12] 慕美财, 张曰秋, 崔从光, 等. 冬小麦高产群体源−库−流特征及指标研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 35−40
Mu M C, Zhang Y Q, Cui C G, et al. Analysis of source-sink-translocation characteristics and indicators for high-yield colony of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 35−40

[13] 刘建丰, 袁隆平, 邓启云, 等. 超高产杂交稻的光合特性研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 258−264
Liu J F, Yuan L P, Deng Q Y, et al. A study on characteristics of photosynthesis in super high-yielding hybrid rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(2): 258−264

[14] 史鸿儒, 张文忠, 解文孝, 等. 不同氮肥施用模式下北方粳型超级稻物质生产特性分析[J]. 作物学报, 2008, 34(11): 1985−1993
Shi H R, Zhang W Z, Xie W X, et al. Analysis of matter production characteristics under different nitrogen application patterns of *Japonica* super rice in north China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(11): 1985−1993

[15] 吴桂成, 张洪程, 钱银飞, 等. 粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 266−276
Wu G C, Zhang H C, Qian Y F, et al. Rule of grain yield components from high yield to super high yield and the characters of super-high yielding japonica super rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(2): 266−276

[16] 孙彦浩, 刘恩鸿, 隋清卫, 等. 花生亩产千斤高产因素结构与群体动态的研究[J]. 中国农业科学, 1982, 15(1): 71−75
Sun Y H, Liu E H, Sui Q W, et al. Research on the high-yield factors and the population development of peanuts[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1982, 15(1): 71−75

[17] 李安东, 任卫国, 王才斌, 等. 花生单粒精播高产栽培生育特点及配套技术研究[J]. 花生学报, 2004, 33(2): 17−22
Li A D, Ren W G, Wang C B, et al. Studies on plant development characters of high-yield cultured peanut and supporting techniques under single-seed precision sowing[J]. Journal of Peanut Science, 2004, 33(2): 17−22

[18] 赵长星, 邵长亮, 王月福, 等. 单粒精播模式下种植密度对花生群体生态特征及产量的影响[J]. 农学学报, 2013, 3(2): 1-5
Zhao C X, Shao C L, Wang Y F, et al. Effects of different planting densities on population ecological characteristics and yield of peanut under the mode of single-seed precision sowing[J]. Journal of Agriculture, 2013, 3(2): 1−5

[19] 冯烨, 郭峰, 李宝龙, 等. 单粒精播对花生根系生长、根冠比和产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(12): 2228−2237
Feng Y, Guo F, Li B L, et al. Effects of single-seed sowing on root growth, root-shoot ratio, and yield in peanut (*Arachis hypogaca* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(12): 2228−2237

[20] 张佳蕾, 郭峰, 杨佃卿, 等. 单粒精播对超高产花生群体结构和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3757−3766
Zhang J L, Guo F, Yang D Q, et al. Effects of single-seed precision sowing on population structure and yield of peanuts with super-high yield cultivation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(18): 3757−3766

[21] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplast. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1−15

[22] 王爱国, 罗广华, 邵从本, 等. 大豆种子超氧物歧化酶的研究[J]. 植物生理学报, 1983, 9(1): 77−83
Wang A G, Luo G H, Shao C B, et al. A study on the superoxide dismutase of soybean seeds[J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 1983, 9(1): 77−83

[23] 华东师范大学生物系植物生理教研组. 植物生理学实验指导[M]. 上海: 人民教育出版社, 1980
East China Normal University. Experimental Instruction of Plant Physiology[M]. Shanghai: People’s Education Press, 1980

[24] Chance B. Methods on Enzymology[M]. New York: Academic Press, 1955: 764−765

[25] 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 等. 水稻叶片的衰老与超氧物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系[J]. 植物学报, 1984, 26(6): 605−615
Lin Z F, Li S S, Lin G Z. Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice leaves[J]. Acta Botanica Sinica, 1984, 26(6): 605−615

[26] Maddonni G A, Chelle M, Drouet J L, et al. Light interception of contrasting azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: Simulations and crop measurements[J]. Field Crops Research, 2001, 70(1): 1−13

[27] 梁晓艳, 郭峰, 张佳蕾, 等. 不同密度单粒精播对花生养分吸收及分配的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 893–901
Liang X Y, Guo F, Zhang J L, et al. Effects of single-seed sowing at different densities on nutrient uptake and distribution in peanut[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,

2016, 24(7): 893–901

[28] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 不同类型饲用玉米群体光合生理特性的研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(3): 536−540
Ma G S, Xue J Q, Lu H D, et al. Photosynthetic and physiological characteristics of the populations of different types of silage maize[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(3): 536−540

[29] 王才斌, 郑亚萍, 成波, 等. 花生超高产群体特征与光能利用研究[J]. 华北农学报, 2004, 19(2): 40−43
Wang C B, Zheng Y P, Cheng B, et al. The canopy characters and efficiency for solar energy utilization of supper high-yielding peanut[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2004, 19(2): 40−43

[30] 郑亚萍, 孔显民, 成波, 等. 花生高产群体特征研究[J]. 花生学报, 2003, 32(2): 21−25
Zheng Y P, Kong X M, Cheng B, et al. Characters of high-yielding peanut canopy[J]. Journal of Peanut Science, 2003, 32(2): 21−25

[31] 冯烨, 李宝龙, 郭峰, 等. 单粒精播对花生活性氧代谢、干物质积累和产量的影响[J]. 山东农业科学, 2013, 45(8): 42−46
Feng Y, Li B L, Guo F, et al. Effects of single-seed precision sowing on active oxygen metabolism, dry matter accumulation and yield of *Arachis hypogaea* L.[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(8): 42−46

[32] 梁晓艳, 郭峰, 张佳蕾, 等. 单粒精播对花生冠层微环境、光合特性及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3700−3706
Liang X Y, Guo F, Zhang J L, et al. Effects of single-seed sowing on canopy microenvironment, photosynthetic characteristics and pod yield of peanut (*Arachis hypogaca*)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3700−3706

[33] 沈毓骏, 安克, 王铭伦, 等. 夏直播覆膜花生减粒增穴的研究[J]. 莱阳农学院学报, 1993, 10(1): 1–4
Shen Y J, An K, Wang M L, et al. Studies on the effect of hole increase with seed decrease on summer sowing peanut (*Arachis hypogaea* L.) under plastic-film-covered cultivation[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 1993, 10(1): 1–4